

Wasserkraftwerke an Bundeswasserstraßen – Eine Datenstudie

Beschreibung der Maschinenteknik und der baulichen Ausgestaltung der Wasserkraftanlagen

Sebastian Roenneberg

Zusammenfassung

Der Beitrag befasst sich mit der Auswertung einer Erhebung zur maschinentechnischen Ausstattung und baulichen Gestaltung der Wasserkraftwerke an großen Bundeswasserstraßen.

Hintergrund dieser Studie ist ein Forschungsvorhaben im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau. Mit Hilfe der Datenstudie soll erfasst werden, welche technischen und baulichen Randbedingungen an Kraftwerken an Bundeswasserstraßen bestehen – dies geschieht im Hinblick auf eine spätere Kategorisierung der Anlagen. Diese wiederum soll den damit beschäftigten Stellen helfen, der großen Anzahl an Anlagen Herr zu werden und für diese effizient und präzise Empfehlungen für die Realisierung der Durchgängigkeit im Rahmen der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie [WHG & WRRL] geben zu können.

In der Untersuchung wurden 88 Kraftwerke an 8 Flüssen (Donau, Fulda, Main, Mosel, Neckar, Saar, Werra, Weser) analysiert. Dies entspricht einer Abdeckung von ca. 50% aller Anlagen mit Wasserkraftnutzung an Bundeswasserstraßen [BfG]. Zieht man den mittleren Abfluss MQ als Maß für die „Größe“ des Kraftwerks heran, konnte eine Abdeckung von ca. 75% der Kraftwerke mit einem $MQ > 60m^3/s$ erreicht werden. Im Hinblick auf bereits zahlreich vorhandene Studien an kleineren Standorten, war die Erfassung der Charakteristika von „großen“ Anlagen das erklärte Ziel der Erhebung – diese Anforderung der Studie kann somit als erfüllt betrachtet werden.

Es wurden hydrologische und allgemeine charakteristische Größen erfasst sowie Daten zur Turbinentechnik und -ausstattung, Betriebsmanagement und insbesondere Saugrohr- und Unterwassergeometrie erhoben.

Von den 64 abgefragten Kriterien konnten für jedes Kraftwerk durchschnittlich 80% aufgenommen werden, wodurch eine in diesem Umfang einmalige Datengrundlage für statistische Untersuchungen der Wasserkraftanlagen an Bundeswasserstraßen zur Verfügung steht.

In diesem Beitrag sollen nun einige Auswertungen vorgestellt werden, welche exemplarisch für die umfassende Datenmenge stehen und aufzeigen, welche Informationstiefe die Datenstudie enthält. Weitergehende statistische Auswertungen sowie der Versuch einer Kategorisierung bzw. Klassifizierung der Anlagenstandorte für spezielle Fragestellungen erfolgen beim Auftraggeber.

1 Motivation

Die vollständige Durchgängigkeit für Fische und andere aquatische Organismen muss mit Frist im Jahr 2027 für alle europäische Binnengewässer erreicht werden [WHG & WRRL]. Fragen der Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen spielen hierbei eine entscheidende Rolle, da eine nachhaltige ökologische Entwicklung in den Gewässern nur dann erreicht werden kann, wenn Fische die bei ihrer Wanderung teilweise hochfrequent anzutreffenden Verbauungen an Flüssen sicher und rasch überwinden können. Neben umfangreichen physikalischen Untersuchungen der

Strömungen im Unterwasser von Staustufen – welche sowohl bei der Bundesanstalt für Wasserbau als auch im Dieter-Thoma-Labor der Technischen Universität München durchgeführt werden – ist eine Bestandsaufnahme der tatsächlich anzutreffenden Situation an den Anlagenstandorten für die Optimierung der Auffindbarkeit entscheidend. So kann erkannt werden, welche Unterwassergeometrien existieren und für welche Anlagentypen entsprechend Lösungen zur Optimierung der Auffindbarkeit gefunden werden müssen. Darüber hinaus lassen sich Klassen bzw. Kategorien von Kraftwerken definieren, in die sämtliche Anlagen eingeordnet werden können. Dadurch ergäbe sich die Möglichkeit Beispielkraftwerke für einzelne Gruppen genauer zu untersuchen und die dabei gefundenen Planungslösungen auf die restlichen Kraftwerke derselben Gruppe anzuwenden. So ließe sich Zeit und Aufwand bei der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie sparen – was im Hinblick auf die große Anzahl an Anlagen und den engen zeitlichen Rahmen wichtig wäre.

Daneben kann die Untersuchung dazu beitragen, die Übertragbarkeit von Forschungs- und Planungsergebnissen vom Modell auf die ausgeführte Anlage sowie von Anlage zu Anlage, besser einschätzen bzw. optimieren zu können.

2 Umfang und Rücklauf der Studie

2.1 Umfang

Da die Datenabfrage bereits zu Projektbeginn so ausgelegt wurde, dass hauptsächlich „größere“ Kraftwerke untersucht werden sollten, wurde die Erfassung auf Anlagen beschränkt, welche in der Hand der fünf großen Wasserkraftbetreiber an bundesdeutschen Wasserstraßen liegen. Diese weisen meist einen Mittelwasserabfluss von $MQ > 50m^3/s$ auf und bilden somit einen hinsichtlich ihrer Größe signifikanten Unterschied zu Anlagen an Flussläufen, welche nicht zu den Bundeswasserstraßen gezählt werden.

Zu den untersuchten Kraftwerken gehören die Anlagen an der Donau, der Fulda, dem Main und der Mosel, sowie an Neckar, Saar, Werra und Weser. Die Daten aller Kraftwerke konnten in enger Zusammenarbeit mit dem jeweiligen Betreiber erfasst werden.

Insgesamt bestehen an Bundeswasserstraßen ca. 350 Staustufen, von denen ca. die Hälfte eine Wasserkraftnutzung aufweist [BfG]. Von ca. 50% dieser Standorte konnten Daten erhoben werden.

Die Karte in *Abbildung 01* zeigt sämtliche Bundeswasserstraßen Deutschlands. Die wichtigsten Flusssysteme sind dabei zusätzlich benannt. Die Standorte mit Wasserkraftnutzung sind darin mit Symbolen gekennzeichnet – unterteilt in von der Studie erfasste (grün) und nicht erfasste (rot) Anlagen.

In den Unternehmensarchiven wurde nach Plänen und weiteren Quellen recherchiert und diese in einem zweiten Schritt auf zuvor definierte Parameter hin untersucht. Die 64 abgefragten Kriterien untergliedern sich in drei übergeordnete Gruppen. Diese sind zum einen allgemeine Daten zur Hydrologie und Leistungsfähigkeit des Kraftwerks sowie spezielle turbinenspezifische Parameter und insbesondere Daten zur Gestaltung des Saugrohrs und der im Anschluss an das Kraftwerk folgenden Unterwassergeometrie.

Das gewählte Vorgehen zur Erfassung der Daten konnte erfolgreich durchgeführt werden, wodurch zu einem Großteil der größeren Wasserkraftwerke an Bundeswasserstraßen Daten zur Verfügung stehen.



Abb. 1 Bundeswasserstraßen in Deutschland inkl. Benennung der größten Flüsse und vorhandener Wasserkraftanlagen; Karte siehe [BMVBS]; Ergänzungen: Autor

2.2 Rücklauf

Die Daten wurden aus Plänen, Zeichnungen und bereits vorhandenen unternehmensinternen Datenbanken in den Zentralarchiven der Unternehmen erhoben. Es konnte hierbei eine große Anzahl an Kraftwerken sowie ein sehr großer Teil der angefragten Parameter erfasst werden.

In *Abbildung 02* sind die Kraftwerke, von denen Daten erhoben werden konnten, nach Flüssen sortiert dargestellt. Die Datengrundlage ist insbesondere an Donau, Main, Neckar, Mosel und Saar sehr gut und es konnten an diesen Flüssen (fast) alle vorhandenen Kraftwerke erfasst werden (siehe auch grüne Kraftwerksymbole in *Abbildung 01*). An Fulda, Werra und Weser konnten einzelne Kraftwerke in die Studie aufgenommen werden. Die übrigen Kraftwerke, welche nicht erfasst wurden, befinden sich – mit Ausnahme der Kraftwerke am Rhein und dem Unterlauf der Lahn – hauptsächlich an kleineren Flussläufen, welche nur bedingt repräsentativ für Bundeswasserstraßen anzusehen sind.

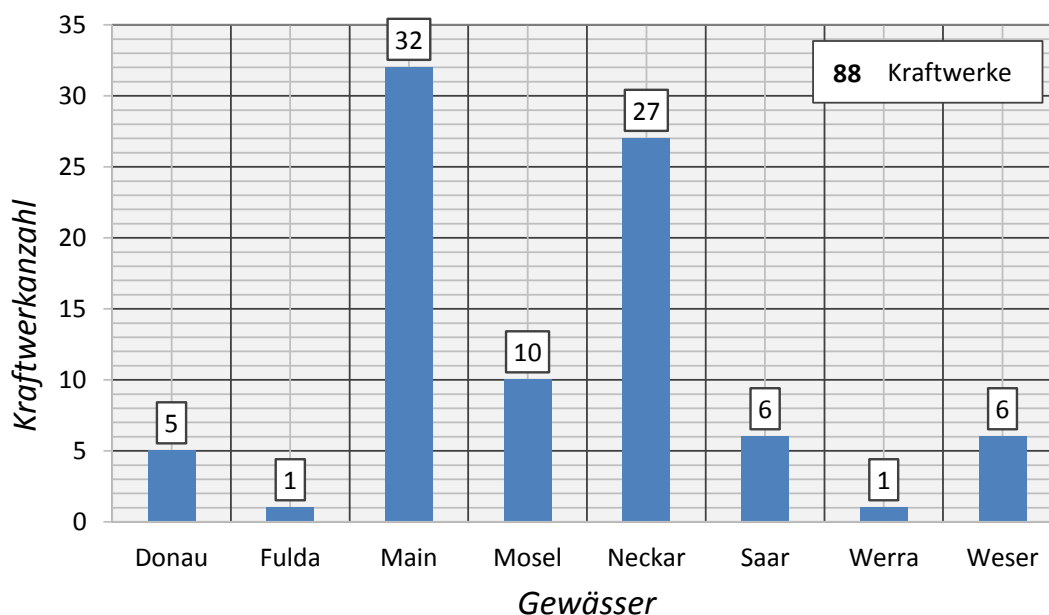


Abb. 2 In der Studie erfasste Kraftwerke, sortiert nach Flüssen

Dass somit die „größeren“ Anlagen in der Studie überproportional abgebildet sind, zeigt *Abbildung 03*, in der die Verteilung der Kraftwerke anhand ihres Mittelabflusses MQ aufgetragen ist. Die grünen bzw. roten Balken zeigen dabei die Anzahl an Kraftwerken in den einzelnen Größenklassen für die Daten erhoben werden konnten (grün) bzw. für die keine Daten vorliegen (rot). Die kumulierte Häufigkeit der Kraftwerksgrößenklassen wird anhand der grünen bzw. roten Linie dargestellt. Der Verlauf der Linien und die Verteilung der Balken zeigen deutlich, dass insbesondere im kleinen Abflussbereich wenige Kraftwerke erfasst wurden. Ab einem Mittelabfluss von ca. $70m^3/s$ überwiegen die Kraftwerke von denen Daten vorliegen. Diesen Eindruck bestätigt auch die blaue Linie, welche die Rücklaufquote der Kraftwerke, von denen Daten vorhanden sind, über dem Mindest-Mittelabfluss darstellt. So liegen beispielsweise von allen Kraftwerken mit einem Mittelabfluss von mindestens $110m^3/s$ von über 80% dieser Kraftwerke Daten vor.

Bei den Kraftwerken von denen Daten erhoben werden konnten, konnten zudem folgende Rücklaufquoten der einzelnen Parametergruppen (siehe auch unter 2.1. *Umfang*) erreicht werden:

- Allgemeine Daten (Hydrologie, Ausbaudaten, Wirkungsgrad) ca. 60%
- Turbinendaten (Typ, Anzahl, Regelung) ca. 80%
- Saugrohr- / Unterwasserdaten (Geometrie, Lage, UW-Sohle) ca. 90%

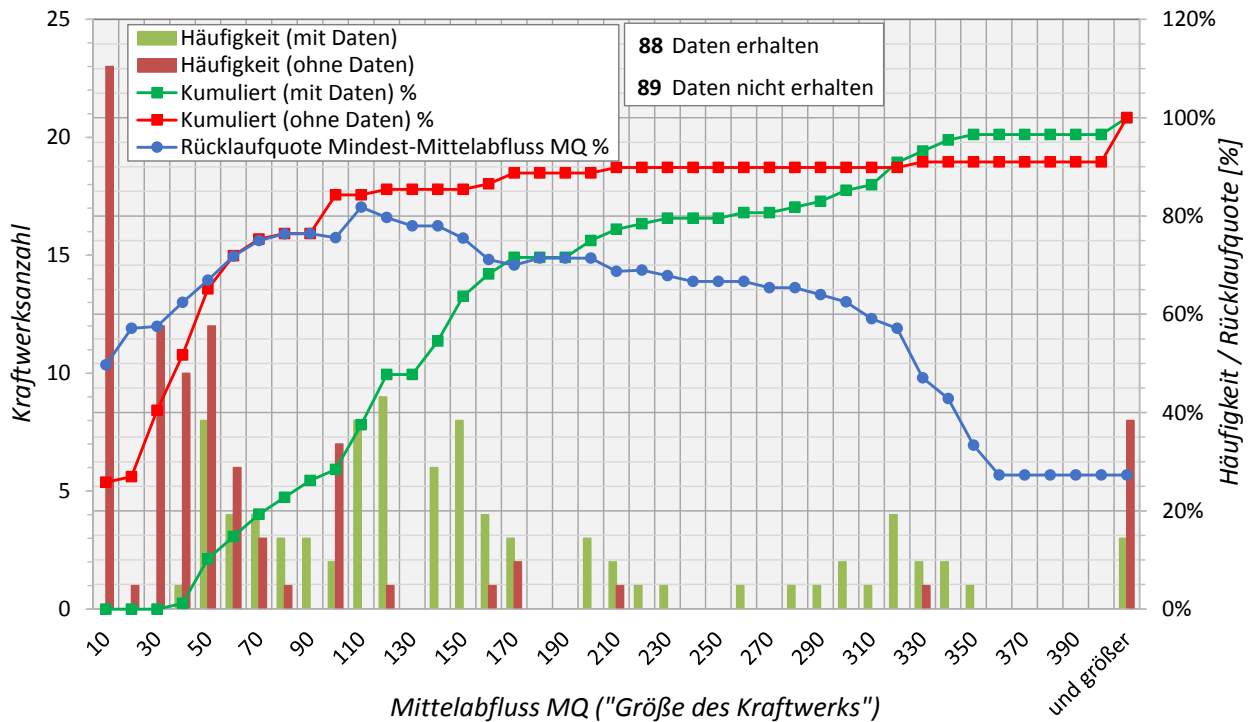


Abb. 3 Von welchen Kraftwerken konnten Daten gewonnen werden? Häufigkeit und Rücklaufquote der abgefragten Kraftwerke – geordnet anhand ihrer Größe (≡ Mittelabfluss MQ)

Insgesamt kann somit – sowohl was die Anzahl an Kraftwerken, als auch die Abdeckung der einzelnen angefragten Parameter betrifft – von einer sehr hohen Rücklaufquote gesprochen werden, welche umfangreiche statistische Auswertungen mit einer verlässlichen und tiefen Datengrundlage ermöglicht.

Zudem konnten – der Ausrichtung der Studie entsprechend – insbesondere Daten von „größeren“ Kraftwerken gewonnen werden.

3 Auswertungen

Hinweis: Die im Folgenden ausgeführten Auswertungen stellen beispielhaft die Möglichkeiten der statistischen Analyse der erhobenen Daten dar. Im Rahmen dieses Beitrags erfolgt keine auf eine bestimmte Fragestellung hin orientierte Auswertung. Die dargestellten Ergebnisse sollen für sich sprechen und dienen keiner übergeordneten Aussage. Die verwendete Datengrundlage (≡ Kraftwerksanzahl) ist jeweils in den Diagrammen festgehalten.

3.1 Turbinentechnik

Zunächst wurden die Kraftwerke auf die verbauten Turbinen untersucht. *Abbildung 04* gibt einen Überblick über die eingesetzten Typen an den analysierten Kraftwerken.

Es finden sich hauptsächlich Kaplan-Halbspiral-, sowie – insbesondere an moderneren Anlagen – Kaplan-Rohrturbinen in unterschiedlicher Ausführung (Bulbturbinen, S-Rohrturbinen, Kegelradrohturbinen). Nur sehr wenige Kraftwerke setzen andere Turbinentypen, wie etwa nicht verstellbare Kaplan-Propellerturbinen, Kaplan-Schachtturbinen oder Francisturbinen ein. Gründe hierfür sind insbesondere in der besseren Regelungsmöglichkeit von Kaplan-Halbspiral-

bzw. Rohrturbinen zu sehen. So kann der Betreiber bei Kaplan-Propeller- bzw. Francismaschinen nur mittels des Leitapparats auf schwankende Abflussmengen reagieren. Da diese Turbinentypen auf einen bestimmten Abfluss hin optimiert wurden, entstehen dadurch bei größeren Abflussänderungen auch starke Einbußen im Wirkungsgrad.

Eine mögliche Alternative um Kaplan-Propeller- oder Francisturbinen doppelt regulieren und somit besser auf die herrschenden Abflussbedingungen einstellen zu können, liegt in der Anpassung der Drehzahl. Allerdings konnten in den erfassten Daten – mit Ausnahme des recht neuen Kraftwerks Kostheim am Main (Kaplan-Pit-Rohrturbinen) – keine Anlagen mit variabler Drehzahl gefunden werden.

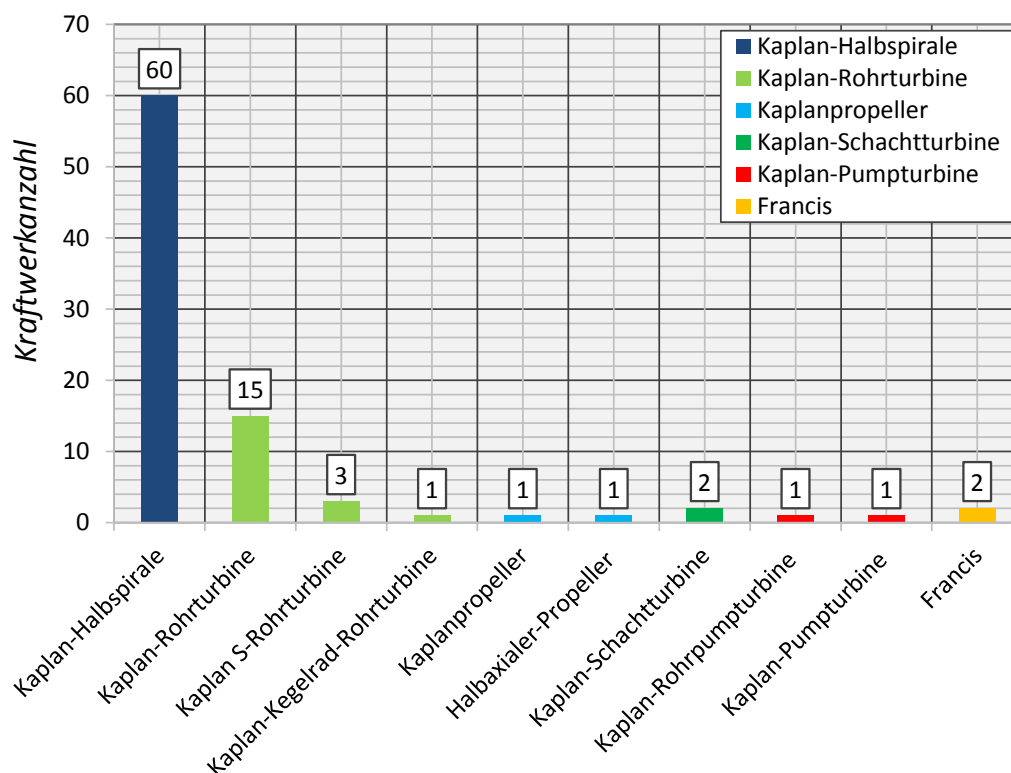


Abb. 4 Verwendete Turbinentypen in den untersuchten Kraftwerken

Hinweis: Im weiteren Verlauf der Auswertung wird auf Grund der in Abbildung 04 dargestellten Ergebnisse, meist zwischen Kaplan-Halbspirale- und Rohrturbinen unterschieden. In den entsprechenden Diagrammen sind die Daten der Kraftwerke mit Kaplan-Halbspiralturbinen („HSp“) blau und die Daten von Kraftwerken mit Rohrturbinen („RT“) grün gekennzeichnet.

Weiterhin wurde auch die Turbinenanzahl untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass die meisten Kraftwerke an Bundeswasserstraßen zwei Turbinen einsetzen (ca. 55% der untersuchten Anlagen). Kraftwerke mit lediglich einer Turbine finden sich an Fulda, am Main, Neckar und der Saar (ca. 12%). Drei Turbinen sind teilweise in Kraftwerken an Donau, Main, Neckar, Werra und Weser verbaut (ca. 16%). Die Moselkraftwerke laufen ausschließlich mit vier Turbinensätzen (ca. 16%) und das Kraftwerk Kachlet an der Donau besitzt acht Maschinen (ca. 1%) – siehe auch Abbildung 05.

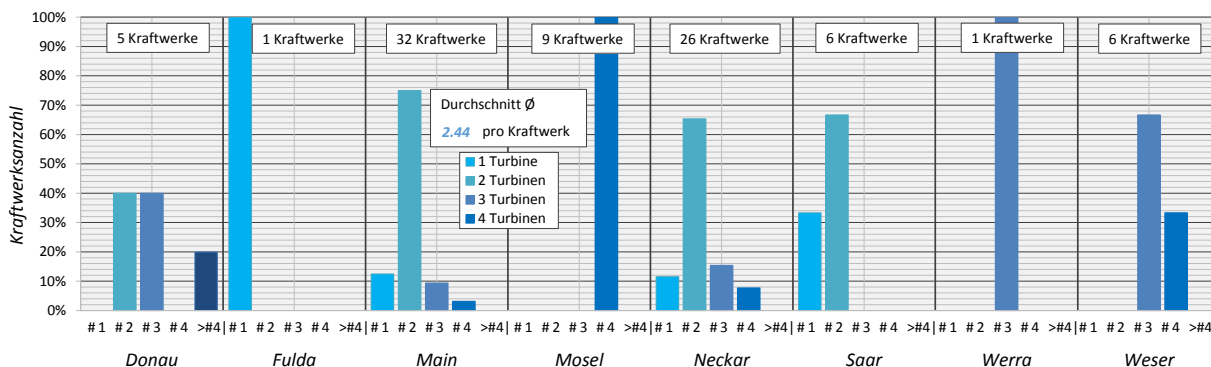


Abb. 5 Relative Häufigkeit der Kraftwerke mit einer bestimmten Anzahl an eingesetzten Turbinen bezogen auf alle untersuchten Anlagen am jeweiligen Fluss

Kombiniert man unterschiedliche Parameter miteinander lassen sich neben der rein numerischen Auswertung der Einzelparameter auch weitergehende Zusammenhänge feststellen. So zeigt *Abbildung 06*, dass ein Zusammenhang zwischen der Drehrichtung der Turbine und der Lage des Krafthauses im Fluss besteht. So finden sich am orographisch rechten Ufer hauptsächlich linksdrehende (Gegen-den-Uhrzeigersinn GUZS) Maschinen und vice-versa.

Ein Grund hierfür kann im Achsversatz von Kraftwerkseinlauf zu -auslauf gesehen werden. So liegt die Symmetrieebene des Saugrohrs bei im GUZS-rotierenden Kaplan-Halbspiral-Turbinen (die den stärksten Einfluss auf diese Statistik haben, siehe *Abbildung 04*) etwas weiter links als die des Einlaufs. Damit lässt sich erklären, dass solche Turbinen bevorzugt am rechten Ufer angeordnet sind, um einen störenden Einfluss beispielsweise des Ufers im Unterwasser auf den Abfluss zu minimieren und im Bau die Erdarbeiten im Uferbereich zu reduzieren.

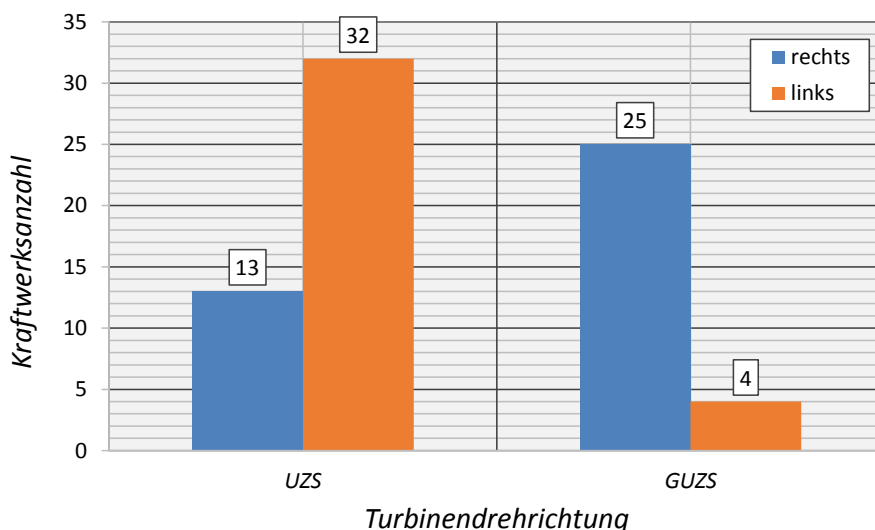


Abb. 6 Zusammenhang zwischen Turbinendrehrichtung (in Strömungsrichtung betrachtet) und Lage des Kraftwerks im Fluss

3.2 Kraftwerksnachlauf

Anhand des Ausbauabflusses der Turbinen und der Saugrohrgeometrie (Breite und Höhe) kann – eine homogen verteilte Strömung angenommen – die Austrittsgeschwindigkeit der Saugrohrabströmung ermittelt werden. Diese beläuft sich bei Kaplan-Halbspiralturbinen mehrheitlich auf 1.2 m/s bis 1.4 m/s und bei Rohrturbinen auf 1.6 m/s bis 1.9 m/s – und ist somit

im Mittel um ca. 30% größer (siehe Abbildung 07). Ein Grund hierfür ist in den tendenziell kürzeren Saugrohren der Rohrturbinen zu sehen, welche geringere Öffnungsverhältnisse (= Saugrohrreitrittsfläche zu Saugrohraustrittsfläche) aufweisen. Dadurch ergibt sich bei Rohrturbinen eine etwas geringere Diffusorwirkung des Saugrohres und entsprechend höhere Austrittsgeschwindigkeiten sind die Folge.

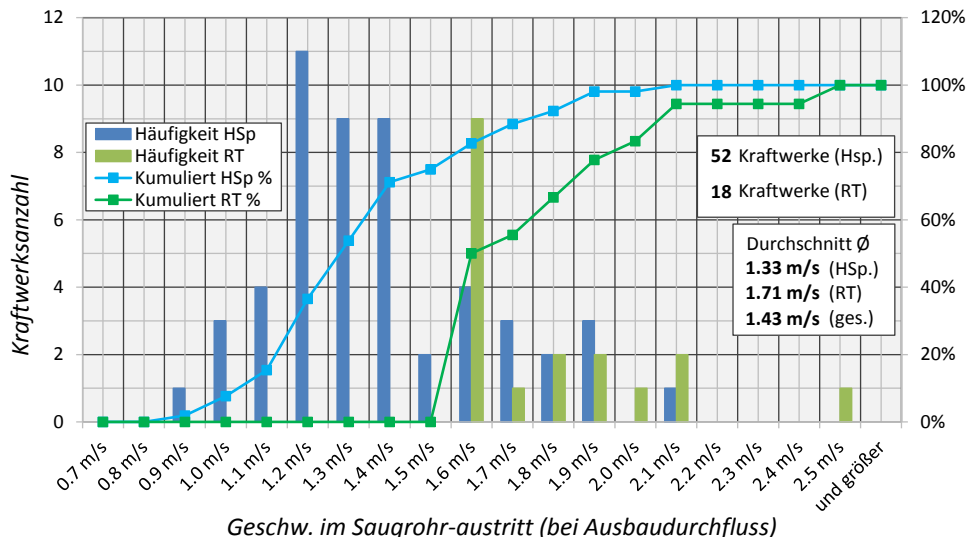


Abb. 7 Austrittsgeschwindigkeit bei Ausbauabfluss (homogene Verteilung angenommen)

Auch für den Zweck der Beschreibung der Unterwassersohlgeometrie wurden einige Parameter erfasst. Neben der Frage, ob es beispielsweise zunächst einen horizontalen Abschnitt nach dem Saugrohrende gibt, zählt die Steigung der Sohle im Anschluss an den Saugrohraustritt zu den untersuchten Kriterien. Diese Größe bewegt sich in einem weiten Spektrum von ca. 4% bis ca. 20% Steigung und weist sowohl bei Kaplan-Halbspiral- als auch Rohrturbinen eine ähnliche Verteilungswahrscheinlichkeit auf. Im Mittel steigt die Sohle bei Verwendung von Rohrturbinen etwas stärker an (13.89% im Vergleich zu 11.84%). Dies ist etwas überraschend, da weitere Auswertungen zeigen, dass Halbspiralturbinen auf Grund ihres Ellbogensaugrohres tendenziell einen tiefer liegenden Auslauf aufweisen als Kraftwerke mit Rohrturbinen.

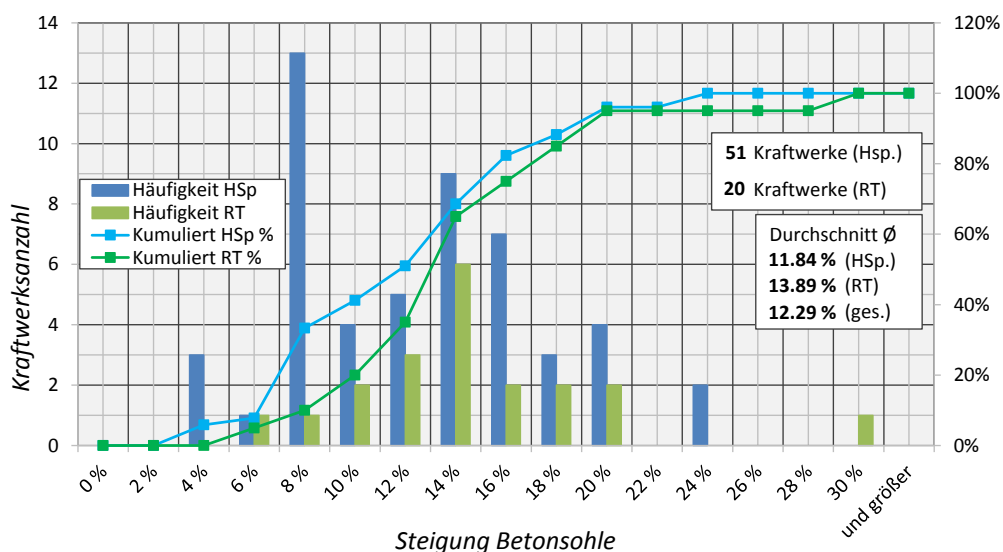


Abb. 8 Steigung der Sohle im direkten Anschluss an das Kraftwerk

4 Ausblick

Die dargestellten Auswertungen sollen einen Einblick in die Tiefe der Datengrundlage geben und die Möglichkeiten aufzeigen, wie durch statistische Auswertungen, Aussagen über die Ausgestaltung der Kraftwerksanlagen getätigt werden können.

Durch die gezielte Verknüpfung einzelner Parameter können vielfältige Auswertungen angestellt werden, um ein fundiertes Bild der Situation an den zahlreichen Kraftwerksstandorten der Bundeswasserstraßen zu erhalten.

Dies kann dazu beitragen, schneller und effizienter als bisher Forschungsergebnisse sowie gefundene Lösungen in der Planung von Fischaufstiegsanlagen an bestehenden Kraftwerken, auf weitere Anlagen in der Natur zu übertragen.

Hierzu läuft bei der Bundesanstalt für Wasserbau ein eigenes Forschungsvorhaben, welches mit Hilfe der vorgestellten Datenbank Zusammenhänge zwischen einzelnen Kraftwerken herzustellen versucht.

Dadurch wird ein wichtiger Beitrag dazu geleistet, die ambitionierten Zeitpläne der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie zur Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen zu erreichen.

5 Danksagung

An dieser Stelle sei den mitwirkenden Kraftwerksbetreibern dafür gedankt, dass sie dieses Projekt durch ihre Teilnahme an der Studie unterstützten und schlussendlich erst ermöglichten. Zudem haben sie durch ihre tatkräftige Mithilfe zum Gelingen der Untersuchung entscheidend beigetragen. Zu nennen sind hier insbesondere die Herren Fischbacher und Dr. Göhl von der RMD AG, die Herren Strasser, Berghoff, Töpler, Bosek und Seuling von der E.ON AG, Dr. Detering und die Herren Schneider, Wilfer, Jonas und Schwarz von der RWE AG, die Herren Buschler und Göbel sowie Frau Nitschke von der EnBW AG und die Herren Thalmann und Schröder von der Statkraft GmbH – besten Dank.

Ein weiterer Dank geht an Herrn Bjarne Bächle MSc. für seine tatkräftige Hilfe, große Geduld und verlässliche und präzise Arbeitsweise bei der Auswertung der Unterlagen.

Datengrundlage & Quellen

Die Daten wurden aus Zeichnungen, Plänen, internen Datenbanken und weiteren Quellen der beteiligten Unternehmen erhoben. Ergänzt wurden sie durch interne Daten des Lehrstuhls für Wasserbau der TU München, Recherchen in Hydrologischen Jahrbüchern, im Internet und auf Googlemaps. Zudem konnten einige Daten aus einer bestehenden Datenbank der Bundesanstalt für Gewässerkunde [BfG] entnommen werden.

Die beteiligten Unternehmen sind im Folgenden gelistet:

- E.ON AG Kraftwerke an Donau und Main
- EnBW AG Kraftwerke am Neckar
- RMD AG Kraftwerke an Donau und Main
- RWE AG Kraftwerke an Mosel und Saar
- Statkraft GmbH Kraftwerke an Fulda, Werra und Weser

Literatur

Weiterführende Literatur ist unter folgenden Quellen zu finden:

- [BfG] König, B. & BfG. BfG-Datenbank zur Kategorisierung der Staustufen an den Bundeswasserstraßen, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 2012.
- [BMVBS] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Bundeswasserstraßenkarte mit der Gliederung der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes DBWK 1000. BMVBS Referat WS 12. Berlin, Mai 2012.
- [DWA] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.. Merkblatt DWA-M 509 - Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef, 2014.
- [WHG] Bundesregierung Deutschland (2009). Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts, Berlin, 2009.
- [WRRL] Europäisches Parlament und Europäischer Rat. EU Wasserrahmenrichtlinie. Bundesumweltministerium – Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, Brüssel, 2000.

Abkürzungen & Formelzeichen

- BAW Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- EU Europäische Union
- *GUZS* Gegenuhrzeigersinn
- *HSp* Kaplan-Halbspiralturbine
- *MQ* Mittelabfluss
- *RT* Kaplan-Rohrturbine
- *UW* Unterwasser
- *UZS* Uhrzeigersinn

Anschrift des Verfassers

Dipl.-Ing. Sebastian Roenneberg
 Technische Universität München
 Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft – Dieter-Thoma-Labor
 Arcisstraße 21, D-80333 München
 sebastian.roenneberg@tum.de